

ВЫБОР УСТРОЙСТВ ЗАЩИТЫ: TVS-ДИОДЫ ПРОТИВ МЕТАЛЛ-ОКСИДНЫХ ВАРИСТОРОВ

СТИВЕН ГОЛДМАН (STEVEN GOLDMAN), технический директор, Infineon Technologies

Кремниевые диоды (TVS) и металл-оксидные варисторы (MOV) применяются для защиты компонентов схем от электростатических разрядов (ESD) и других переходных процессов. Надежность данных способов защиты можно оценить, применяя два типа защитных устройств (TVS или MOV) в аналогичных условиях. Статья представляет собой сокращенный перевод [1].

Идеальное защитное устройство ограничивает энергию, поступающую в защищаемую нагрузку до уровня, при котором нагрузка остается неповрежденной. Хорошие устройства защиты должны обладать малым ограничивающим (clamping) напряжением, низким током утечки, небольшим динамическим сопротивлением и высоким быстродействием. Очень важны и другие факторы, такие как срок службы, воспроизводимость, размер, занимаемый на плате, стоимость, надежность и наличие механизма безопасного сбоя (safe failure).

Для сравнения рассматриваемых устройств защиты и оценки переходных процессов при воздействии 15-кВ всплесков напряжения были проведены лабораторные тесты и корреляционное SPICE-моделирование. Во всех случаях в качестве нагрузки использовалось стандартное сопротивление 50 Ом. В ходе исследований высокочастотный отклик системы не определялся.

Разработчикам всегда следует помнить о разнице ESD-стандартов приборного (Device-Level) и системного (System-Level) уровней. Для определения предельных условий работы, которые способны выдерживать отдельные компоненты, использовались стандарты приборного уровня, такие как «Модель человеческого тела» (Human

Body Model (HBM)), «Модель автомата» (Machine Model (MM)) и «Модель заряженного устройства» (Charged Device Model (CDM)). Для определения предельных условий работы всей системы применялись стандарты системного уровня — IEC61000-4-2 (см. рис.1). Даже при одном и том же напряжении выходные токи во всех случаях значительно отличались.

Например, при напряжении 10 кВ пиковый ток, полученный по модели HBM, оказался равным 6,67 А, в то время как по модели IEC61000-4-2 пиковое значение сигнала наблюдалось при 37,5 А. К тому же по модели HBM максимальный ток был отмечен через 10 нс, тогда как по модели IEC61000-4-2 — через 1 нс. Динамика процессов di/dt по двум моделям также сильно различалась. Необходимо понимать, что номинальные ESD-параметры устройства являются главными при выборе лучшего устройства защиты. В спецификации номинальных характеристик устройства производитель обычно указывает ESD-уровень, при котором гарантирована сохранность устройства даже без применения дополнительных мер. Такие спецификации определены для промышленного стандарта сигналов 8 мкс/20 мкс, никак не связанного с сигналами 1 нс/100 нс. Плюс к этому, промышлен-

ный стандарт по номинальным характеристикам устройств на 1 А не содержит никаких данных о работе системы при токе 56,25 А, пиковом токе при всплеске электростатического напряжения 15 кВ. Выбор лучшего защитного устройства обеспечит более надежную защиту нагрузки.

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ

Устройства защиты работают либо в обычном режиме, либо в режиме защиты. В обычном режиме (см. рис. 2) система не испытывает никаких внезапных всплесков тока или напряжения. Сигнальные линии свидетельствуют о том, что устройство «идеально защищено», т.е. цепь «идеальной защиты» остается разомкнутой, и через нее ток не течет. Любой ток, текущий в это время через цепь защиты, считается током утечки. Именно этот ток уменьшает продолжительность жизни батарей в портативных устройствах и искажает сигналы при защите линий связи, USB-портов, HDMI-линий, звуковых каналов и т.д. Пока ток утечки достаточно мал, это, как правило, сказывается только на работе блоков питания и на количестве потребляемой энергии. Сигнальные линии страдают, в основном, от емкости устройств защиты. Поскольку далеко не все производители приводят гарантированные максимальные значения номинальных характеристик, необходимо тщательно сравнивать эти спецификации.

Всплески напряжения или тока заставляют перейти устройство в режим защиты (см. рис.3). Идеальное устройство защиты при этом превращается в короткозамкнутую на землю цепь. В идеале при любых энергетических всплесках весь ток должен течь через цепь защиты, защищая нагрузку от повреждений. После исчезновения опасности идеальное устройство защиты быстро возвращается в нормальный режим защиты, без каких-либо внутренних повреждений или изменений рабочих характеристик.

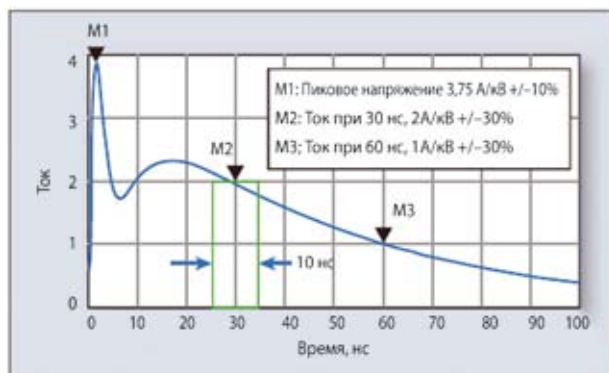


Рис. 1. Стандарт системного уровня IEC61000-4-2, предназначенный для установления предельных условий работы системы

СРОЧНЫЕ ПЛАТЫ

Любая партия от 2-х дней!



на алюминии
на фторопласте
на керамике
на полиамиде
на стеклотекстолите



прототипы печатных плат
суперсрочное изготовление
серийное производство
комплектация
SMT и DIP монтаж
монтаж BGA



Специализированный
завод печатных плат
«Электроконнект»



Москва (495) 787-65-02 Санкт-Петербург (812) 430-90-71 Ростов-на-Дону (863) 262-70-53 Пермь (3422) 23-26-71 Екатеринбург (343) 251-29-69 Новосибирск (383) 336-10-01

www.pselectro.ru

РАЗЛИЧИЯ В ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

Полупроводниковые диоды TVS являются монокристаллическими устройствами, изготовленными по стандартным полупроводниковым технологиям. Они могут быть выполнены в виде линеек устройств или быть встроены в более крупные блоки, например, в комбинированные защитно-фильтрующие системы. Их характерными особенностями являются высокое быстродействие, низкое напряжение ограничения и высокая надежность. При эксплуатации в условиях, заложенных при проектировании, их характеристики со временем не ухудшаются и не зависят от количества аварийных срабатываний. В зависимости от режимов работы устройства защиты заряды через р-п-переход переносятся в разных направлениях. Защитные устройства TVS, как правило, используются для защиты низковольтных компонентов.

MOV-варисторы — это керамические устройства, состоящие из металлооксидных зерен. Их структура подобна структуре сахарного кубика. Граница между зернами формирует зону с диодной вольт-амперной характеристикой. Такие диоды самостоятельно выстраиваются в произвольные группы из параллельных и последовательных комбинаций. Случайным образом

сформированная структура варисторов отличается большим разбросом определенных параметров. Рабочие характеристики MOV-варисторов зависят от объемных характеристик устройства (высота×длина×ширина). Устройства больших размеров способны выдерживать очень высокие уровни напряжений. По этой причине MOV-варисторы используются, в основном, для защиты силовых схем.

MOV-варисторы являются саморазрушающимися устройствами. В каждом случае перенапряжения часть диодных структур типа «зерно-земля» выходит из строя, в основном, по причине местного перегрева. Лабораторные измерения подтверждают этот факт, фиксируя в нормальном режиме работы после каждого срабатывания защиты увеличение тока утечки. По мере

того, как увеличивается количество вышедших из строя диодных структур, устройство из варистора превращается в резистор. Продолжительные периоды перенапряжений, очевидно, сокращают продолжительность жизни варистора как защитного устройства. Скорость выхода из строя устройства обратно пропорциональна его объему. Многослойные варисторы и некоторые другие типы MOV-устройств способны ограничивать ток, текущий через них, стараясь замедлить процесс деградации. Некоторые варисторы изначально проектируются с большим внутренним сопротивлением, что также помогает снизить ток, протекающий через них. В каждом случае разработчику приходится искать компромисс между рабочими характеристиками защитного устройства и его надежностью.

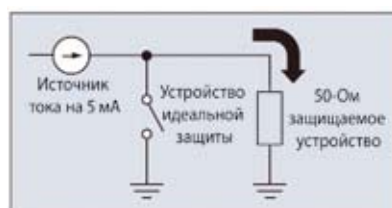


Рис. 2. В обычном режиме защищаемое устройство не испытывает никаких внезапных всплесков тока и напряжения, поэтому цепь «идеальной защиты» остается разомкнутой



Рис. 3. При возникновении опасных скачков тока или напряжения «идеальное» устройство защиты превращается в короткозамкнутую на землю линию, что защищает нагрузку

Большинство производителей считает устройство вышедшим из строя после того, как его определенные параметры изменились на 10%. Более подробную информацию следует искать в документации производителей.

Отказ как TVS-диодов, так и MOV-варисторов, обычно имеет вид разрыва. В этом случае защищаемое устройство остается без защиты, и следующее опасное перенапряжение может вывести нагрузку из строя. Выход из строя

TVS-диодов иногда протекает по типу короткого замыкания, в таком случае они представляют собой сопротивление номиналом 1 Ом.

MOV-устройства страдают от тепловых пробоев. Поскольку такие устройства с течением времени все больше приближаются к резисторам, ток, постоянно текущий через них, усиливает процесс их внутреннего разрушения, и, наконец, происходит их тепловой пробой. Керамическая

структура MOV-устройств позволяет им выдерживать гораздо более высокие температуры, чем структура полупроводниковых диодов. Корпусные MOV-варисторы способны нагреваться до температур выше 400°C. При поверхностном монтаже MOV-устройств в них обычно расплавляются внутренние места пайки. В высоковольтных приложениях необходимо принимать специальные меры для ограничения тока через защитные устройства. Возможно, в таких случаях имеет смысл использовать проволочные резисторы, которые при выходе из строя чаще всего разрывают цепь. Некоторые заказчики требуют установки последовательно с варисторами плавких вставок (fuses).

ТОК УТЕЧКИ

Все устройства защиты включаются между сигнальной линией и землей. В некоторых устройствах может быть большое количество защитных компонентов, и общий дополнительный ток через них может создавать определенные проблемы. Маломощные и низковольтные сигнальные цепи очень чувствительны к любым дополнительным токам.

В мюнхенской лаборатории ESD-тестирования (ESD Testing Facility) провели исследования двух типов защитных устройств. В тестовых испытаниях для проверки надежности защиты 50-Ом сигнальной линии, напряжение на которой не должно превышать 5 В, подавалось постоянное напряжение смещения 20 В. При этом проводились измерения тока через проверяемое защитное устройство. Для 5-В сигнальной линии основной интерес представляет зона постоянного напряжения 5 В. У тестируемого TVS-диода ток утечки составил 0,01 нА, в то время как у двух MOV-устройств он был порядка 1 нА. Для высоковольтных приложений предпочтительнее TVS-диоды, поскольку их ток утечки на два порядка ниже. При повышении температуры ток утечки в некоторых устройствах также повышался. Испытания проводились при 25°C. На рисунке 4 показана зависимость тока утечки от приложенного напряжения для TVS-диодов и MOV-устройств.

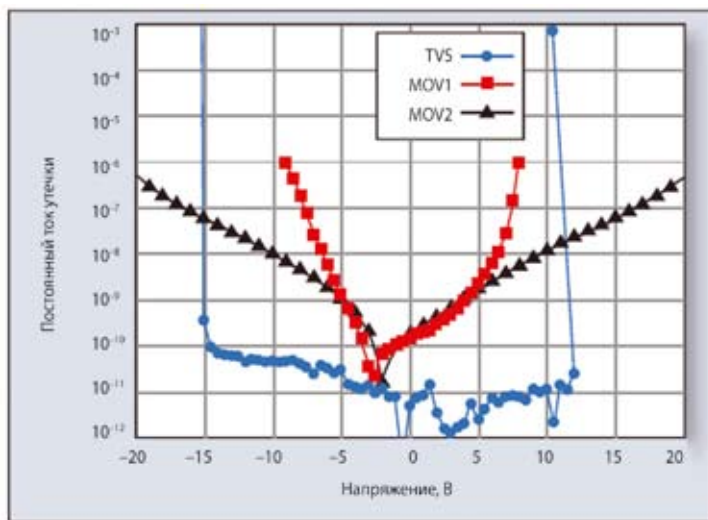


Рис. 4. Зависимость абсолютного значения тока утечки от приложенного напряжения для тестируемых TVS-диодов и MOV-устройств

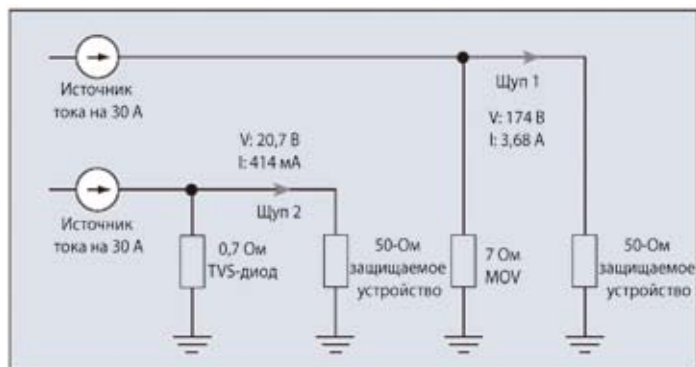


Рис. 5. Схема, используемая для сравнения TVS-диодов и MOV-устройств при нагрузке 50 Ом, продемонстрировала, что в режиме защиты TVS-диод пропустит приблизительно на 10% тока меньше, чем MOV-устройство

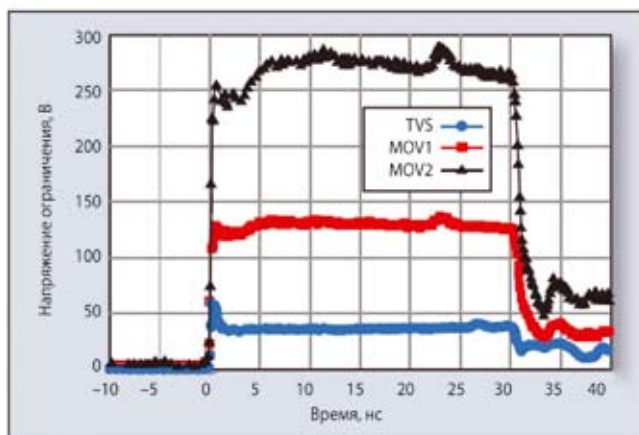


Рис. 6. Устройства защиты ограничивают пики напряжения на нагрузке. Напряжение ограничения TVS-диодов значительно ниже, чем у MOV-устройств

НИЗКООМНЫЕ ЦЕПИ ЗАЩИТЫ

В режиме защиты защитное устройство должно обладать низким сопротивлением. Идеальная вольт-амперная характеристика имеет вид вертикальной прямой: $V(I) = V_{br}$ (где V_{br} — напряжение пробоя). Большинство производителей определяет напряжение пробоя при $\pm 0,001$ А и напряжение ограничения при ± 1 А. Сопротивление в линейной области вольт-амперной характери-



LI-POЛ АККУМУЛЯТОРЫ СЕРИИ LP

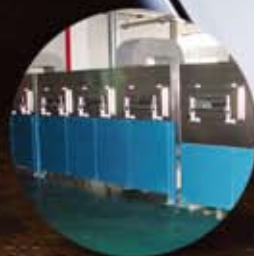
Каждый месяц мы выпускаем 9 миллионов изделий!

Параметры и преимущества:

- Выходное напряжение 3,7 В
- Емкость: от 65 мА*ч до 10,5 А*ч
- Долгий срок службы
- Тонкий корпус, малая масса
- Высокая удельная емкость
- Экологически безопасны

Применение:

- Телекоммуникационное оборудование
- Портативные приборы
- Мобильные телефоны и коммуникаторы
- Видео- и фотокамеры
- Ноутбуки
- Электрические игрушки



A,B,C,D 25/F Fortune Plaza
ShenZhen P.R.China518040
тел.: +86-755-83022275
факс: +86-755-83021966
e-mail: global@eemb.com

Москва:
Тел.: (495) 995-0901
Факс: (495) 995-0902.
Санкт-Петербург:
Тел.: (812) 327-9404
Факс: (812) 327-9403
E-mail: eemb@compel.ru

СПОСОБНОСТЬ К ОГРАНИЧЕНИЮ ЭНЕРГИИ

Хорошие устройства защиты должны быстро ограничивать ток и напряжение. Всплеск напряжения 15 кВ используется для моделирования наихудшего сценария. Для генерации входного сигнала, как правило, используется простая схема, состоящая из конденсатора 150 пФ, резистора 330 Ом и источника напряжения на 15 кВ. Пиковый ток наблюдается в начале, после чего мощность входного сигнала нулевой сразу не становится.

На рисунке 7 показаны кривые мощности в нагрузке. TVS-диоды отличаются низким напряжением ограничения, малым сопротивлением и хорошим быстродействием. Энергия в нагрузке рассчитывается по площади, ограниченной соответствующей кривой.

В рассматриваемых низковольтных приложениях TVS-диоды были рассчитаны на энергию в нагрузке 4,5 мкДж, а MOV-устройства — 18,0 мкДж, т.е. между этими защитными устройствами наблюдалась разница в 4 раза. Эта разница в энергиях может привести либо к защите устройства, либо к его выходу из строя, в зависимости от области безопасной работы (SOA) нагрузки. Следует выбирать то устройство защиты, которое обеспечивает самую широкую зону безопасности внутри SOA-нагрузки.

В некоторых высоковольтных и высокоамперных приложениях требуется применение либо больших MOV-устройств, либо линеек из TVS-диодов. Разработчик обязан обеспечить надежный уровень защиты системы при любых катастрофических поломках. Перенапряжение выше уровня, указанного в спецификациях большинства TVS-диодов, ведет к резкому выходу устройства из строя по типу короткого замыкания. Однако система должна продолжать работать в режиме безопасного отказа. Диоды выходят из строя быстро, поэтому из-за короткого интервала времени они не успевают выработать большого количества тепла. Металл-оксидные варисторы выходят из строя по другому сценарию. Их рабочие параметры смещаются по мере роста количества аварийных ситуаций, даже если перенапряжение не выходит за пределы уровня, указанного в спецификации. Их проводимость становится выше, что ведет к возникновению тепловых пробоев. Керамическая структура MOV-устройств может выдерживать более высокие температуры, чем структура их кремниевых конкурентов.

При резком повышении температуры может произойти разрушение или взрыв некоторых типов MOV-устройств, что возможно приведет к

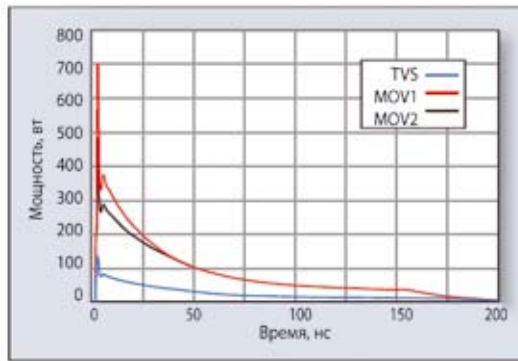


Рис. 7. По расчетным кривым мощности определена энергия в нагрузке: 4,5 мкДж для TVS-диодов (синий график) и 18,0 мкДж для MOV-устройств (красный график)

стики рассчитывается при обратном ее наклоне ($\Delta V/\Delta I$). По иронии судьбы, этот наклон называется динамическим сопротивлением (R_{dyn}), но в действительности он используется в статических измерениях или в расчетах параметров по модели IEC61000-4-2 через 10 нс после начала энергетического всплеска. Во время электростатических разрядов комплексный импеданс устройств защиты динамично меняется, и обозначение данного параметра как R_{dyn} часто сбивает разработчиков с толку. Для прогнозирования напряжения в течение первых 10 нс требуются другие методы.

Тестовые испытания показали, что динамическое сопротивление TVS-диода на порядок ниже, чем у рассматриваемых MOV-устройств. В соответствии с условиями проведения теста по модели IEC61000-4-2 15-кВ разряд должен сопровождаться вторичным пиком повышения тока при 30 А. Это значение часто используется как при проведении контактных испытаний, так и при моделировании разряда в воздухе, поскольку к моменту повышения тока все переходные процессы от 15-кВ разряда уже должны полностью закончиться. По результатам испытаний, полученных в ходе 30-А всплеска, может быть рассчитано сопротивление соответствующего устройства защиты.

По окончании первых 10 нс испытаний по модели IEC61000-4-2 расчеты напряжения значительно упрощаются, что связано с увеличением периодов нарастания и спада сигнала. Сигнал, полученный по модели IEC61000-4-2, в интервале времени 25...35 нс часто аппроксимируется прямоугольными импульсами амплитуды 2 А/кВ. При 15-кВ всплеске напряжения это составляет 30 А. Заменяя устройства защиты на их сопротивления, рассчитанные при 30 А, получим схему устройства по постоянному току (см. рис.5), по которой можно быстро определить напряжение и ток в нагрузке в течение интервала времени действия тока 30 А.

Ток через нагрузку определяется следующим образом:

$$I_{load} = (30 \times R_{pr}) / (R_{pr} + 50)$$

$$I_{TVS} = 21/50,7 = 0,414 \text{ А}$$

$$I_{MOV} = 210/57 = 3,68 \text{ А}$$

Сопротивление нагрузки, показанное здесь, равно 50 Ом. Во время всплеска тока в интервале 25...35 нс нагрузка, защищаемая TVS-диодом, получает ток, уменьшенный в 10 раз. Мощность (I^2R) в течение всплеска определяется как: $I_{load} \times I_{load} \times 50$ Ом. Поскольку мощность пропорциональна квадрату тока (коэффициент пропорциональности определяется сопротивлением нагрузки), очевидно, что лучше минимизировать ток через нагрузку.

НАПРЯЖЕНИЕ ОГРАНИЧЕНИЯ

Устройства защиты ограничивают пики напряжения на нагрузке. При проведении лабораторных испытаний на испытуемые устройства подавались возбуждающие импульсы напряжением 300 В длительностью 30 нс. Из графиков, приведенных на рисунке 6, видно, что все защитные устройства прореагировали довольно быстро, но обеспечили разные уровни напряжения. Зернистость варисторов не дает возможности получать низкие значения напряжения ограничения, т.к. при последовательном сочетании диодных структур их пороговые напряжения складываются. Из рисунка 6 видно, что TVS-диоды обеспечивают значительно более низкое напряжение ограничения, чем MOV-устройства, что способствует снижению энергии в низковольтных приложениях. Как ранее утверждалось, полученные динамические результаты сильно отличаются от значений V_{clamp} , приводимых в технической документации на эти устройства. При известном уровне тока входного сигнала значение V_{clamp} может быть аппроксимировано следующим выражением:

$$V_{breakdown} + (R_{dyn} \cdot I_{known}) + L di/dt.$$

По модели испытаний IEC61000-4-2 член $L di/dt$ через 10 нс становится равным 0.

**Плёночные конденсаторы
для силовой электроники
серии E50-PK16™**

ELECTRONICON
always in charge



- Рабочее напряжение/ток: до 3000В / до 120А
- Ёмкость: до 7400мкФ
- Полипропиленовый самовосстанавливающийся диэлектрик с малыми потерями
- Идеальны для замены последовательно соединенных электролитических конденсаторов
- Низкое значение собственной индуктивности: 40нГн
- Низкое последовательное сопротивление: менее 3мОм
- Для IGBT-преобразователей частоты, инверторов, источников питания, фильтров

www.argussoft.ru

ARGUSSOFT

ОФИЦИАЛЬНЫЙ
ДИСТРИБЬЮТОР

• Москва

Тел.: (495) 660-2855
Факс: (495) 660-2855
E-mail: mos@argussoft.ru

• Санкт-Петербург

Тел.: (812) 412-0107
Факс: (812) 412-1549
E-mail: spb@argussoft.ru

• Новосибирск

Тел.: (383) 227-1155
Факс: (383) 222-4031
E-mail: nsk@argussoft.ru

• Екатеринбург

Тел.: (343) 378-3242
Факс: (343) 378-3241
E-mail: ural@argussoft.ru

• Казань

Тел.: (843) 293-4100
Факс: (843) 293-4100
E-mail: kazan@argussoft.ru

выходу устройства из строя по типу разрыва. MOV-устройства без видимых разрушений могут выдерживать температуры, превышающие температуру загорания бумаги, что может стать причиной пожара. Разработчики должны учитывать это и обеспечивать защиту схемы в любых условиях перепадов напряжений и больших токов.

Многие системы, в состав которых входят специальные микроконтроллеры или интерфейсные схемы, лучше защищать TVS-диодами, в то время как сетевые блоки или высоковольтные каскады постоянного тока следует защищать MOV-устройствами. Низковольтные сигнальные линии лучше защищать TVS-диодами, однако, некоторые типы нагрузок могут

надежно работать в пределах их SOA под защитой обоих типов устройств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Steven J. Goldman/ Protection Devices: TVS Diodes vs. Metal-Oxide Varistors// http://powerelectronics.com/power_management/regulator_ics/selecting-protection-devices-201006/.

НОВОСТИ СЕТЕЙ И ИНТЕРФЕЙСОВ

| ПРОМЫШЛЕННАЯ БЕСПРОВОДНАЯ СЕТЬ. ПОСТУЛАТЫ 2 И 3 | 2. Не гонитесь за высокими частотами — чем ниже частота, тем проще физика распространения сигнала.

Устройства промышленного класса обычно работают на частотах, не требующих лицензирования (частоты ISM — Industrial, Scientific, and Medical — промышленность, наука и медицина). Используемая частота и мощность сигнала зависят от страны. Наиболее распространенные диапазоны: 2,4 ГГц — почти по всему миру; 915 МГц — США, Южная Америка и некоторые другие страны; 868 МГц — Европа.

С ростом частоты доступная полоса обычно также увеличивается, однако радиус действия и способность преодолевать препятствия уменьшаются. Для заданного расстояния на частоте 2,4 ГГц будут наблюдаться потери в канале примерно на 8,5 дБ больше, чем на частоте 900 МГц. С другой стороны, чем ниже частота, тем более крупная антенна требуется для получения одинакового усиления.

3. Чувствительность приемника определяет качество работы на больших расстояниях. Чем более чувствителен приемник, тем более слабый сигнал он может успешно принять. Однако сравнивать приемники по чувствительности имеет смысл не всегда, слишком велико разнообразие. Более подходящий критерий — частота появления ошибочных битов (BER) в защищенной от внешних шумов схеме. Если помехи, обусловленные присутствием посторонних передатчиков, работающих на той же частоте, малы, то шумовой порог будет ниже порога чувствительности приемника и заявленное производителем значение чувствительности можно применять при оценке работы беспроводной системы и ее радиуса действия.

Чувствительность приемника и, следовательно, зону охвата, всегда можно улучшить за счет снижения скорости передачи данных. Во многих устройствах пользователю предоставляется возможность уменьшать скорость передачи, чтобы увеличить радиус приема.

Кроме того, чувствительность на низких частотах выше, чем на высоких. В этом смысле диапазон 2,4 ГГц уступает диапазону 900 МГц на 6—12 дБ.

www.russianelectronics.ru